

а радиус области контакта определяется из условия равенства нулю нормального перемещения, которое согласно (3) приводит к равенству

$$b(\tau) = f^{-1}[l - u_{c3}(\tau)]. \quad (4)$$

При этом контактная сила в (1) выражается через преобразование Фурье нормальных напряжений (индекс « $F$ » обозначает изображение;  $q$  – параметр преобразования):

$$R_3(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_{330}(x_1, \tau) dx_1 = \lim_{q \rightarrow 0} \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_{330}(x_1, \tau) e^{iqx_1} dx_1 = \sigma_{330}^F(0, \tau).$$

Нормальное напряжение на границе полуплоскости определяется интегральным соотношением с последующим определением соответствующей функции Грина. Выражение для результирующей силы имеет вид

$$R_3(\tau) = -\chi(\tau) \int_{-\infty}^{\infty} \dot{u}_{30}(x_1, \tau) dx_1 = -2\chi(\tau)[b(\tau)\dot{u}_{c3}(\tau)], \quad (5)$$

где  $\chi(\tau)$  – функция, определяемая свойствами вязкости материала полуплоскости.

Таким образом, на сверхзвуковом этапе взаимодействия определение перемещения центра масс ударника сводится к решению вытекающей из (1) и (5) начальной задачи для интегродифференциального уравнения при начальных условиях (2).

Для дозвукового этапа контактного взаимодействия нормальные перемещения границы вязкоупругой полуплоскости и контактные напряжения связывает интегральное уравнение вида (дополнительная звездочка соответствует свертке по координате  $x_1$ ):

$$w(x_1, \tau) = G(x_1, \tau) \sigma_{330}(x_1, \tau), \quad (6)$$

где функция Грина  $G(x_1, \tau)$  для вязкоупругой полуплоскости определяется с использованием теоремы об обобщенной свертке.

Следовательно, на дозвуковом этапе взаимодействия замкнутая система разрешающих уравнений определяется соотношениями (1), (3), (4), (6) при начальных условиях (2).

Приведены решения полученных систем уравнений для сверхзвукового и дозвукового этапов контактного взаимодействия, проанализировано влияние свойств вязкости материала полуплоскости на характеристики взаимодействия.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 16-38-60074 мол\_а\_дк, 17-08-01146а).

УДК 656.13

## ОСОБЕННОСТИ КРЕПЛЕНИЯ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ АВТОТРАНСПОРТОМ

*И. Е. КРАКОВА, А. О. ШИМАНОВСКИЙ, О. И. ЯКУБОВИЧ*  
*Белорусский государственный университет транспорта г. Гомель*

В настоящее время наблюдается массовое применение автотранспортных средств для перевозки грузов и пассажиров как во внутреннем, так и в международном сообщениях. Грузы, предъявляемые к перевозке автомобильным транспортом, обладают различными свойствами, определяющими технические условия перевозок. От правильности крепления грузов в кузове автомобиля зависит целостность груза в процессе транспортировки и безопасность самой перевозки. Следует отметить, что по статистике два из трех опрокидываний автомобилей с грузом на дороге можно было бы предотвратить, если бы крепление самого груза было выполнено должным образом.

В Беларуси перевозка грузов осуществляется в соответствии с Правилами крепления грузов на автомобильном транспорте, разработанными исходя из того, что перевозимый груз жесткий. В реальности значительное количество транспортируемых объектов обладает высокой деформативностью. К таким грузам относятся, в частности, сэндвич-панели, широко применяемые в строительстве. Они представляют собой трехслойную конструкцию, включающую в себя две обшивки из металлических профилированных листов, между которыми располагается средний слой из минера-

ловатных плит. Пакеты, сформированные из таких панелей, имеют большие размеры при относительно небольшой массе. Производители с целью снижения затрат на перевозку размещают их в два яруса. Поэтому при перевозке центр тяжести груза располагается высоко над полом автоплатформы, что приводит к большим значениям моментов сил инерции. Это, в свою очередь, может стать причиной вынужденных колебаний груза в продольном и поперечном направлениях. Последствия от таких колебаний, которые наблюдались на практике: смещение сэндвич-панелей относительно друг друга внутри пакета, разрушение транспортного пакета и, как следствие, нарушение товарных качеств панелей.

Большинство работ, посвященных вопросам крепления и безопасности транспортировки грузов, не рассматривают возможность их деформации. Существующие исследования напряженно-деформированного состояния трехслойных и многослойных пластин не учитывают возможности их размещения в пакете, сформированном из нескольких аналогичных пластин, который, в свою очередь, совершает колебания относительно подвижной системы отсчета. Перед нами стояла задача проанализировать используемый на практике вариант крепления пакетов с сэндвич-панелями, чтобы выработать рекомендации по креплению, которое позволит обеспечить сохранность груза при перевозке на большие расстояния.

Для анализа достаточности крепления, подбор которого осуществлен из условия недеформируемости груза, разработана упрощенная механико-математическая модель перевозимого на автоплатформе грузового места, которое состоит из двух транспортных пакетов, сформированных из сэндвич-панелей. Рассмотрен случай их расположения в два яруса. Учитывались деформации груза и средств его крепления. Для моделирования минеральной ваты, составляющей средний слой панелей и обладающей большой деформативностью, использованы пружины. Принималось во внимание крепление грузового места к автоплатформе с помощью прижимного ремня, который при перевозке воспринимают действующие на груз силы инерции и работает на растяжение. Причем учтено, что в процессе транспортировки вследствие наличия поперечных сил и колебаний груза натяжение ветвей ремня различны. Для учета поперечных сил, возникающих при деформировании транспортных пакетов, в расчетную схему введен демпфер.

С применением уравнений Лагранжа II рода составлена система дифференциальных уравнений, описывающих движение рассматриваемой системы. Решение уравнений выполнялось с помощью программы MathCAD. Выполненные расчеты для различных механических характеристик пружин и ремней крепления показали, что амплитуда колебаний вертикальные ярусов составляет около 2 см. При движении по неровной дороге это значение будет увеличиваться. Введенный в расчетную схему демпфер не обеспечивает динамическую устойчивость системы при колебаниях. В то же время амплитуда скорости постепенно увеличивается, а панели постепенно смещаются в поперечном направлении. Такое смещение может наблюдаться, например, при входах в поворот. Следовательно, выполненные расчеты продемонстрировали недостаточность поперечной жесткости транспортных пакетов, установленных в два яруса по высоте, что приводит к смещениям панелей внутри пакета при входах в повороты и выходах из них. Такая ситуация наблюдалась на практике при транспортировке груза из Беларуси в Туркменистан.

В ходе проведенного анализа было установлено, что при подборе крепежных средств, исходя из предположения о недеформируемости груза, из-за большой высоты транспортного пакета он обладает недостаточной устойчивостью в поперечном направлении. Большая высота груза приводит к существенному различию сил натяжения ветвей ремней, расположенных по разные стороны от груза, при движении по кривым. Из-за различия сил натяжения ремней крепления и малого модуля упругости минеральной ваты происходит деформирование транспортного пакета, в процессе перевозки развиваются его колебания, что, в свою очередь, ведет к смещению панелей внутри транспортного пакета. При перевозке на большие расстояния такие смещения накапливаются и, в конце концов, могут стать причиной повреждения груза. Поэтому для обеспечения достаточного крепления сила натяжения крепежных ремней должна быть увеличена более чем в два раза по сравнению с расчетом без учета опрокидывания.

С помощью программного комплекса ANSYS построена конечноэлементная модель перевозимого груза, учитывающая особенности геометрии панелей и их нагружения при транспортировке. Выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния нижнего яруса для сэндвич-панели, верхний и нижний слой которой выполнен из стали с модулем упругости 200 ГПа, а средний – из минеральной ваты, имеющей модуль упругости 3 МПа. Также учитывалось наличие пенопластовой прокладки, на которую укладывалась нижняя панель. Модуль упругости пенопласта принят равным 10 МПа. Выполненные расчеты показали, что по мере уменьшения числа панелей в ярусе наблюда-

ется постепенное снижение уровня напряжений в нижней панели. При этом напряжения не превышают предел прочности минеральной ваты при высоте штабеля, равной девяти панелям. Это соответствует заявленному производителем значению высоты транспортного пакета 1,5 м.

В соответствии с нормами расчета крепления грузов на автотранспорте следует принимать во внимание дополнительные вертикальные динамические нагрузки, которые равны силе тяжести груза. Анализ результатов конечноэлементного моделирования деформирования нижней панели нижнего яруса груза показал, что в таком случае при силах натяжения крепежных ремней, обеспечивающих неподвижность жесткого груза аналогичных размеров, в случае укладки по высоте десяти и более панелей в минеральной вате возникают напряжения, превышающие ее предел прочности. Следовательно, наблюдается разрушение минеральной ваты, что подтвердилось в известном нам случае перевозки сэндвич-панелей. В свою очередь появление трещин в минеральной вате и ее расслоение становится причиной снижения жесткости конструкции и приводит, в том числе, к пластическим деформациям металлических поверхностей панелей, что наблюдалось на практике. Полученные результаты объясняют, почему при доставке груза из 14 и 13 сэндвич-панелей, расположенных друг над другом, произошло их разрушение.

Таким образом, результаты расчетов параметров движения рассматриваемой системы и определения напряженно-деформированного состояния нижней панели показали, что при разработке схем крепления грузов следует учитывать их деформативность. При перевозке грузов на большие расстояния наличие неровностей дорожного покрытия и входов в повороты может приводить к смещению груза, опрокидыванию и его повреждению.

Обеспечить надежное крепление груза и его целостность можно, если перевозка сэндвич-панелей будет осуществляться с использованием жесткой упаковки, не допускающей влияния верхних ярусов груза на нижние.

УДК 539.3

### **РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ТЕРМОУСТОЙЧИВОСТИ ТОНКОСТЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛОМ ВОЗДЕЙСТВИИ, ВОЗНИКАЮЩЕМ В ПРОЦЕССЕ СОЗДАНИЯ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ**

*А. С. КУРБАТОВ, А. А. ОРЕХОВ, Л. Н. РАБИНСКИЙ*  
*Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация*

Рассматривается задача термоустойчивости тонкостенной конструкции при нестационарном тепловом воздействии в несвязной постановке. Построена конечно-элементная модель пластины, на одну из сторон которой действует нестационарный тепловой поток, моделирующий движение лазерного луча. Получены численные решения динамической задачи теплопроводности и квазистатической задачи потери устойчивости в различные моменты времени. Проведена параметризация и получены зависимости критической мощности потока от толщины пластины.

УДК 621.7

### **ПОСТРОЕНИЕ ТЕСТОВЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ РАСТУЩИХ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ В ПРОЦЕССЕ ПОСЛОЙНОГО ЛАЗЕРНОГО СИНТЕЗА**

*А. С. КУРБАТОВ, А. А. ОРЕХОВ, Ю. О. СОЛЯЕВ, С. И. ЖАВОРОНОК*  
*Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация*

Моделирование технологического процесса послойного лазерного синтеза изделий представляет собой сложную задачу, при решении которой должны рассматриваться процессы теплопередачи, фазовых превращений и плавления, а также учитываться эффекты остаточных напряжений и деформации, усадки, анизотропии свойств получаемых материалов и т. д. Сложность моделей и большое количество неизвестных параметров, которые должны определяться экспериментально, делают постановку задачи плохо обусловленной при рассмотрении процессов синтеза реальных изделий сложной формы.